

## Динамические процессы и системы

УДК 621.787:539.319

Букатый А.С., Букатый С.А.

### НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ ПО КРИТЕРИЮ ЖЁСТКОСТИ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Основные детали (диски, валы и др.), определяющие ресурс газотурбинных двигателей (ГТД), работают в условиях малоциклового усталости и длительной прочности. При этом в наиболее нагруженных областях – зонах концентрации напряжений – в каждом цикле нагружения возникают упругопластические деформации. Поэтому возникает необходимость расчётного диагностирования состояния деталей и выявления наиболее нагруженных областей с учётом условий деформирования и типа напряжённно-деформированного состояния (НДС), которые существенно влияют на циклическую долговечность деталей. Повышение долговечности деталей без изменения конструкции достигается применением упрочняющей обработки методами поверхностного пластического деформирования. Назначение оптимальных режимов упрочнения связано с исследованием остаточных напряжений (ОН) и проведением испытаний на усталость. С целью проведения предварительного расчётного анализа режимов упрочняющей обработки без проведения дорогостоящих испытаний был применён разработанный в данной работе комплексный критерий.

Известно, что увеличение составляющих всестороннего растяжения – шарового тензора напряжений – существенно увеличивает жёсткость напряжённного состояния (НС) и уменьшает предельную пластичность материала. Однако в практике проектирования ГТД оценку конструкционной прочности основных деталей осуществляют на основе анализа НДС с использованием эквивалентных напряжений по энергетической теории Губера – Мизеса (Huber M.T., Mises R.), аналитическое выражение которых совпадает с выражением интенсивности напряжений ( $\sigma_{\text{экв}} = \sigma_i$ ):

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}. \quad (1)$$

В работе предлагается учитывать тип НС коэффициентом жёсткости напряжённного состояния [1, 2]

$$K_{\text{ж}} = \frac{3\sigma_0}{\sigma_i} = \frac{\sqrt{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_0$  – среднее (октаэдрическое) напряжение,  $\sigma_0 = 1/3 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ ;  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений (1).

Степень нагруженности деталей наилучшим образом характеризует удельная энергия  $U_0$ , затраченная на упругопластическое деформирование материала, которую можно разделить на упругую  $U_{0y}$  и пластическую  $U_{0пл}$  составляющие

$$U_0 = U_{0y} + U_{0пл},$$

где

$$U_{0y} = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)], \quad (3)$$

$$U_{0пл} = (S_1\varepsilon_{1пл} + S_2\varepsilon_{2пл} + S_3\varepsilon_{3пл}),$$

$S_i$  – средняя величина главных напряжений, действующих в материале в процессе его пластического деформирования;  $\varepsilon_{iпл}$  – соответствующие пластические деформации;  $i = 1, 2, 3$ .

Обычно при упругопластическом нагружении равные или превышающие предел текучести  $\sigma_T$  напряжения действуют только в одном из главных направлений. В остальных двух направлениях пластические деформации, в соответствии с законом Пуассона, протекают при напряжениях существенно меньших  $\sigma_T$ . Тогда выражения для напряжений  $S_i$  в случае растяжения при условии  $\sigma_1(\varepsilon) > \sigma_T$  можно выразить следующим образом

$$S_1 = \frac{1}{2}(\sigma_T + \sigma_1(\varepsilon_1)), \quad S_i = \frac{\sigma_i}{2\varepsilon_i}(\varepsilon_{iy} + \varepsilon_i),$$

где  $\varepsilon_{iy}$  – упругая составляющая деформаций;  $\varepsilon_i = \varepsilon_{iy} + \varepsilon_{iпл}$  – полная деформация. При этом  $i = 2, 3$  при растяжении или  $i = 1, 2$  при сжатии.

В задачах диагностики опасных мест или оптимизации конструкции деталей удобнее пользоваться безразмерными критериями. Поэтому энергетический критерий представим как отношение  $U_0$  к некоторой предельной величине  $U_{0пред}$ , которую также представим из двух слагаемых

$$U_{0пред} = U_{0y\_пред} + U_{0пл\_пред} = \frac{\sigma_T^2}{2E} + \sigma_{ср}e, \quad (4)$$

где  $\sigma_{\tau}$  – напряжение, равное физическому или условному пределу текучести материала;  
 $\sigma_{\text{ср}} = 0,5(\sigma_{\tau} + \sigma_{\text{max}})$  – среднее напряжение на участке упрочнения диаграммы растяжения;  
 $e = \ln(1 + \delta) - \ln(1 + \varepsilon_{\tau})$  – натуральная деформация;  $\delta$  – относительное удлинение;  
 $\varepsilon_{\tau} = \sigma_{\tau} / E$  – предельная упругая деформация материала.

Тогда на основании (3) и (4) энергетический критерий будет иметь вид

$$K_U = \frac{U_0}{U_{0\text{пред}}} = \frac{U_{0y} + U_{0\text{пл}}}{U_{0y\_пред} + U_{0\text{пл\_пред}}}. \quad (5)$$

В результате получаем следующий комплексный критерий для анализа НС деталей

$$K_{y\text{-пл}} = K_{\text{ж}} \cdot K_U. \quad (6)$$

В основе решения задачи назначения рациональных режимов упрочнения лежит создание в поверхностном слое детали такого распределения ОН, при котором деталь будет обладать необходимым пределом выносливости при условии, что технологические остаточные деформации (ТОД) не превысят технологические допуски. Решение данной задачи состоит из трёх основных этапов.

Первый этап – определение величины остаточных (или соответствующих им начальных) напряжений в поверхностном слое упрочняемой детали, которые обеспечивают наибольшее повышение предела выносливости.

Второй этап заключается в прогнозировании возможных ТОД деталей, обусловленных перераспределением начальных напряжений (НН). Если возможные деформации детали превышают технологические допуски, то на основе расчётных методик необходимо определить такие величины НН и зоны упрочнения, которые обеспечат необходимую геометрическую точность детали.

Указанные выше расчётные методики могут быть разработаны на основе аналитических [3] и конечно-элементных (численных) методов [4].

На третьем этапе после определения на предыдущих этапах необходимого уровня НН требуется найти параметры режимов упрочнения, обеспечивающие в поверхностном слое детали указанные напряжения.

Для реализации первого и третьего этапов, как правило, предварительно проводят экспериментальные исследования связи параметров режима упрочнения ( $\lambda_i$ ) с величиной и глубиной залегания НН и пределом выносливости, которые определяют на образцах или опытных деталях. Для широко используемого в настоящее время дробеструйного способа упрочнения микрошариками основным управляемым параметром является давление воздуха или рабочей жидкости. Остальные параметры регламентированы, исходя из

конструкции установок, либо являются взаимозависимыми и обусловлены размерами и геометрией упрочняемых деталей. Приведённые в первом этапе испытания на усталость являются дорогостоящим трудоёмким мероприятием. В авиационной промышленности поверхностному упрочнению подвергается большая номенклатура деталей, поэтому назначение режимов упрочняющей обработки необходимо осуществлять максимально эффективно и в кратчайшие сроки.

Для решения поставленной задачи применён комплексный критерий. Ранее проведённые исследования показали, что оптимизация НДС детали по комплексному критерию приводит к увеличению сопротивления усталости деталей, как в малоцикловой, так и в многоцикловой области. При назначении режимов упрочнения выбор параметров обработки целесообразно проводить путём анализа и оптимизации НДС детали с учётом остаточных напряжений по комплексному критерию. Моделирование и анализ НДС с учётом упрочняющей обработки осуществляется в пакетах конечно-элементного анализа [4]. При этом в процессе оптимизации значение комплексного критерия необходимо минимизировать. Дополнительные исследования режимов упрочнения с помощью испытаний на усталость целесообразно проводить для особо ответственных деталей, имеющих ограниченный запас по сопротивлению усталости. Такими деталями являются лопатки и диски ГТД, тонкостенные детали, работающие в многоцикловой области, и другие.

### **Библиографический список**

1. Смирнов-Аляев, Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. Инженерные методы [Текст] / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1968. – 272 с.
2. Агоджино, А.М. Влияние надрезов, напряжённое состояние и пластичность [Текст] / А.М. Агоджино // Тр. Амер. о-ва инж.-мех. Пер. с англ. М.: Мир. – 1978. – №4. – С. 12-19.
3. Букатый, С.А. Прогнозирование коробления деталей ГТД после обработки поверхности на основе исследования остаточного напряжённого состояния материала [Текст]: автореф. дисс. докт. техн. наук : 05.07.05, 01.02.06 / С.А. Букатый. – Рыбинск, 1996. – 28 с.
4. Букатый, А.С. Назначение оптимальных режимов упрочнения деталей ГТД с учетом геометрии упрочняемых деталей [Текст] / А.С. Букатый // Авиация и космонавтика 2008: Тезисы седьмой международной конференции. – 2008. – С. 68.